

# 赤色巨星の赤外スペクトル — ISO / SWSでさぐる外層大気

青木和光

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉

email: waoki@optik.mtk.nao.ac.jp

赤外スペース天文台 (ISO) を用いた赤色巨星・AGB 星の分光観測により、さまざまな分子スペクトルや金属の微細構造線が観測された。これにより、従来観測困難であった外層大気の姿が少しずつ明らかになってきている。赤色巨星の光球および外層に関して、ISO による我々の観測によって明らかになったこと、新たに提起されている問題について紹介する。

## 1. 赤色巨星研究の課題

### — 外層大気

質量のあまり大きくない (太陽の約 8 倍以下) 星は、主系列をはなれ赤色巨星に進化すると、比較的短期間にさまざまな変化を示し、最終的には外層部を失って白色矮星に進化していくと考えられています。特に、漸近巨星分枝 (AGB) 星とよばれる、赤色巨星のなかでも進化の進んだ段階の星は、大規模な質量放出を起こし、星の周りに大量の物質をまとうようになります。また、星の内部での核反応の結果が表面に現れるのも重要な特徴で、炭素星 (炭素が酸素よりも多い星。なお、太陽をふくめたいていの星は酸素が炭素よりも多い) も AGB 段階で多数形成されると考えられています<sup>1)</sup>。

このような天体の構造の概念図を図 1 に示しました。赤色巨星においても、光球については、観測的にも理論的にもよく調べられ、モデルもある程度確立しているといえます。また、星の半径の数百倍あるいはそれ以上に広がった温度の低い外層 (本稿では「星周外層」と呼ぶことにします) も、電波域の分子輝線の観測などによってその特徴はある程度調べられ、質量放出率や膨張速度が求められています。これに対して、光球と星周外層の中間の領域 (恒星半径の数倍から数十倍程度) に

ついては、比較的理解が進んでいません。この領域は数百度から千数百度の温度をもち、おそらく複雑な化学反応がおこって分子や固体粒子 (ダスト) が形成されていると考えられますが、それだけにモデル化することは大変な作業になります。さら

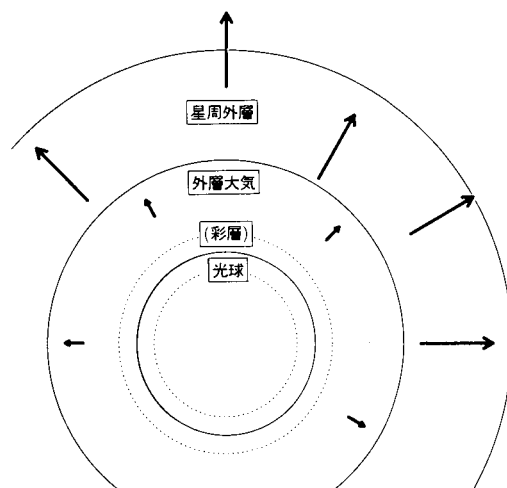


図 1 : 赤色巨星の光球から星周外層にかけての概念図。主に可視光・近赤外線を放射している光球と、電波域の分子輝線などで観測される低温の星周外層、その間にひろがる外層大気の区分を示した。質量放出流は、外層大気で加速され、星周外層ではほぼ等速になると考えられているが、その機構は十分にはわかっていない。

に星によっては数千度の彩層が存在することも知られています。本稿ではこの領域をまとめて「外層大気」と呼ぶことにしますが、質量放出に重要な役割を果たしていると考えられる外層大気の構造や組成を調べることは、赤色巨星の研究の中でも重要な課題のひとつです。

外層大気は、そのひろがり小さく、空間的に分解して観測することが困難であり、また温度は千度前後であると考えられるため、赤外スペクトルの観測が不可欠です。そこで我々は赤外スペース天文台 (ISO) を用いて赤色巨星の分光観測を行うことにしました。ISO について<sup>2)</sup>、その観測成果について<sup>3)</sup>、とくに分光器 (SWS) を用いた赤色巨星の観測について<sup>4)</sup> はそれぞれのレビューを見ていただくことにして、本稿では我々の観測の結果を紹介することにします。

我々のグループは、ISO のコアプログラムにかなりの時間をもらって、さまざまなスペクトル型の赤色巨星の分光観測を行いました。ISO は長期にわたるプロジェクトであり、筆者が大学院に入るころには、我々の観測計画もほぼ固まっておりました。多くの人々の力で実現した観測なのですが、実際にデータを手にして解析するのは、主にグループリーダーの辻先生と大学院生の筆者ということになり、データをふんだんに用いて研究できるという好運に恵まれたのでした。

我々の観測の初期成果としては、M 型巨星 (酸素過多の星) の外層大気に、水や二酸化炭素などのガスが大量に存在していることを発見したことがあげられます<sup>4), 5)</sup>。とくに、早期 M 型の星に水分子が見つかったことは、赤色巨星の進化と外層大気の形成に新たな問題を提起すると考えています。

本稿でまず取り扱うのは、筆者が主に解析を行った炭素星の分子スペクトルです。当初は炭素星のいかにも複雑そうなスペクトルを見ては、どこから手をつけたらよいのか、困惑の日々を送ったことを思い出しますが、かなりの部分をどうにかとぎはぐすことができた<sup>6)</sup>ので、それを 2 節で紹介します。

また、金属の微細構造線も予想以上に多数観測されました<sup>7)</sup>。これは分子スペクトルと違って、M 型星と炭素星を区別する必要はないだろう、ということで筆者がまとめて解析することになりました。ところがこれが実は M 型星と炭素星でだいぶ様相が異なる、という話を 3 節でいたします。

## 2. 炭素星の分子スペクトル

図 2 に、炭素星 2 天体について、3 から 8  $\mu\text{m}$  までのスペクトルを示しました。実にさまざまな分子バンドが同定されましたが、このように明確なバンドスペクトルの検出は、ISO / SWS のなかでも高分解能モード (分解能約 1500) を用いてはじめて可能になったものであり、貴重なスペクトルであるといえます。ちなみに高分解能モードを用いた 2.4–45  $\mu\text{m}$  全域の観測には 2 時間以上かかっています。

これらの分子吸収スペクトルは、主として星の光球において形成されていると考えられます。光球以外の成分——外層大気および星周外層——の影響は後で議論することにして、まずは、分子バンドと星の炭素組成との関係をみてみましょう。

### 2.1. 炭素組成との関係

図 2 に示したのは、N 型炭素星 TX Psc と SC 型炭素星 WZ Cas のスペクトルです。N 型星というのは、温度の低い炭素星のなかではもっとも数が多く、可視域では  $\text{C}_2$  や CN の見事なバンドが観測される、いわば典型的な炭素星です。一方、SC 型星は、同じく低温度星なのですが、 $\text{C}_2$  のバンドが著しく弱いために、N 型星と区別された星です。これは SC 型星の炭素組成が N 型星にくらべて小さい——炭素は酸素に比べて 1% ほど超過しているにすぎない——ためです。そこで、N 型星と SC 型星を比べると、炭素組成に対する依存性を議論することができます。なお、これらの星の有効温度は 3000 から 3100 度程度で、大きな違いはありません。

まず、3 ~ 4  $\mu\text{m}$  にかけて、N 型星 TX Psc には

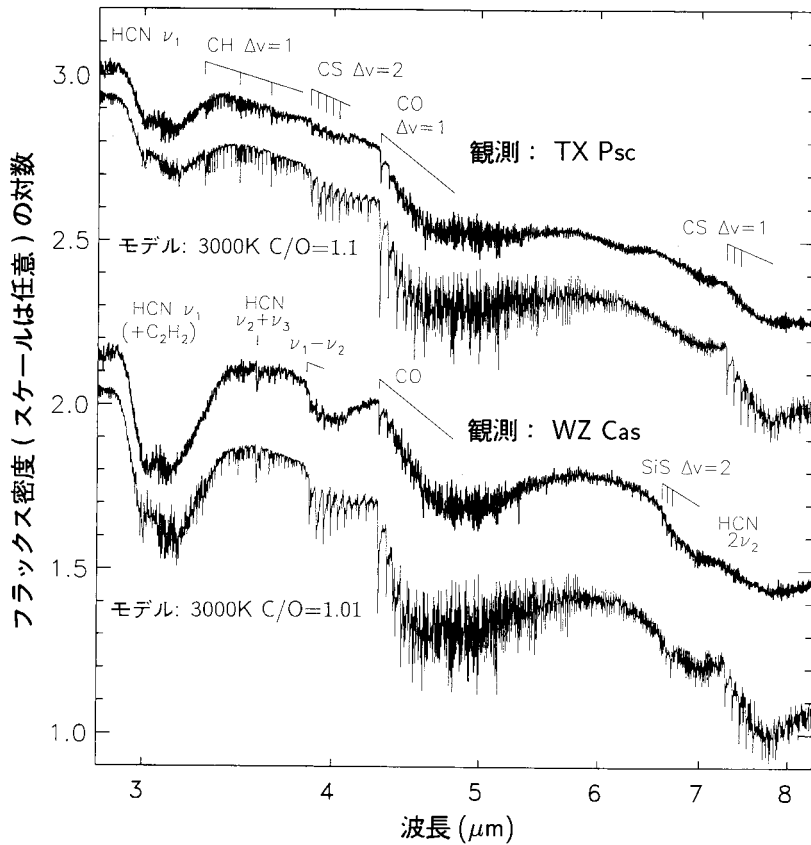


図2：N型星 TX Psc と SC型炭素星 WZ Cas の赤外スペクトル (3-8  $\mu\text{m}$  域) および対応するモデルから計算された合成スペクトル。図には同定された分子吸収も示した。

CH分子の振動回転スペクトルがはっきりとうかっています。一方、SC型星 WZ Cas には、CH分子はほとんどみえていません。これは、SC型星の炭素組成が小さいことを考えれば当然の結果といえます。一方、少しややこしいのが、WZ Cas に検出された SiS 分子 (6.6  $\mu\text{m}$ ) の場合です。この分子は TX Psc には検出されませんでした。これも、実は以下のように炭素組成の違いでよく説明できます。これらの星の光球の温度では、CS分子が比較的安定に存在します。実際、4  $\mu\text{m}$  付近には CS 分子吸収バンドがうかっています。すると、N型星では、大部分の硫黄 (S) がこの CS 分子に取り込まれることとなります。これに対し、SC型星では、

CO分子にとりこまれないで残っている炭素 (C) が非常に少なく、CS分子が形成されても硫黄のほうが豊富に残ることになります。この硫黄がシリコンとくっついて SiS 分子を形成することができることとなります。大雑把にいうと、これが SC型星 WZ Cas で SiS 分子が検出された理由です。

さて、この波長域でいちばん目立つのが、シアン化水素 (HCN) 分子のバンドです。炭素星の特徴のひとつである 3  $\mu\text{m}$  のバンドをはじめ、3.6  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$ 、さらには 7  $\mu\text{m}$  の吸収も検出されました (3  $\mu\text{m}$  と 7  $\mu\text{m}$  のバンドにはアセチレン (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 分子の吸収も混じっているのですが、光球モデルを用いた計算などから、これらの星では HCN 分子

の吸収が卓越しているとみられます)。HCN 分子吸収は、ご覧の通り、SC 型星のほうがかなり強いことがわかります。これは、炭素を含んだ他の分子 ( $C_2$  や CH など) とは逆の傾向です。これはどう考えたらよいのでしょうか？

HCN のような多原子分子の形成は、 $C_2$  などの二原子分子にくらべて、一般に光球の温度に敏感で、一定の温度を下回ると急激にその組成が増えます。光球の温度構造には、炭素星のような低温度星の場合には、可視から近赤外域にかけての分子 ( $C_2$  や CN など) による吸収が大きく影響します。つまり、 $C_2$  や CN 分子による温室効果がどのくらい効くか、という問題です。SC 型星では、その定義から  $C_2$  分子や CN 分子の吸収が弱く、温室効果が小さいため、同じ有効温度をもつ N 型星に比べて光球の浅い層の温度が数百度低いということがモデル計算などからわかっています。この結果、多原子分子である HCN は、炭素組成が少ないという不利な条件にもかかわらず、光球の温度が低おかげで SC 型星において大量に存在することができると考えられます。

以上のように、低温度星の光球では、化学組成が分子形成に影響し、その分子による吸収が光球の温度構造に影響し、それがまた分子形成に影響を与え……という複雑な関係があり、その結果が分子スペクトルとして観測されるわけですが、N 型星と SC 型星の赤外分子スペクトルはそのよい例だといえます。

以上の結果は、我々の光球モデルを用いても基本的に再現することができます。同定された分子バンドを全部考慮した合成スペクトルを、TX Psc (N 型) と WZ Cas (SC 型) について図 2 に示しました。合成スペクトル作成の際には、有効温度や炭素組成などのパラメータは、測光観測やフーリエ分光観測などから求められた値をそのまま採用していますが、それでも観測をかなりよく再現しており、我々の光球モデルは、これらの星の基本的な性質を反映しているといえます。

しかし、一歩立ち入ると、話はそう甘くはないのです。

## 2.2 外層大気からの分子放射スペクトル

どちらの星にも、4～5  $\mu\text{m}$  にかけて、CO 分子の振動回転スペクトルがみえます。これをよく見ると、観測されたバンドは、合成スペクトルのものにくらべてかなり弱いことがわかります。同様のことは、4  $\mu\text{m}$  と 7  $\mu\text{m}$  の CS 分子バンドについてもいえます。CO や CS といった分子は、炭素星の光球では安定で、組成の多い分子であり、これらの吸収バンドをきちんと説明できないのは重大な問題です。このように弱い吸収バンドは、何を意味しているのでしょうか？

考えられるのは、光球がかなりふくらんでいるか、あるいは多量の分子からなる外層大気が存在していて、そこからの分子による放射が、吸収をうめてしまっている、という描像です。今回示した合成スペクトルは、実は光球の厚みを無視した平行平板モデルにもとづいていますが、CO 分子のバンドに関しては、光球が膨らんでいる効果を考慮したモデルを用いても大きな違いがないことが知られています。そのため、なんらかの理由で光球が予想以上に大きく膨らんでいるか、外層大気が存在していると考えられます。

その場合、より長い波長域では、光球の周りからの放射の寄与が相対的に大きくなるため、吸収スペクトルが弱められるだけでなく、分子の放射スペクトルが直接観測される可能性があります。我々は、HCN および  $C_2H_2$  のバンドの存在する 14  $\mu\text{m}$  域の観測に力をいれました。この波長域では、残念ながら天体あまり明るくないため、なかなか良質なデータをえられなかったのですが、TX Psc については、図 3 に示したとおり、HCN 分子の放射を直接検出することができました (吸収バンドは非常に弱い)。これは広がった光球もしくは外層大気存在を強く示唆する結果です (なお、この星の場合、HCN 分子の励起は主に光球からの輻射

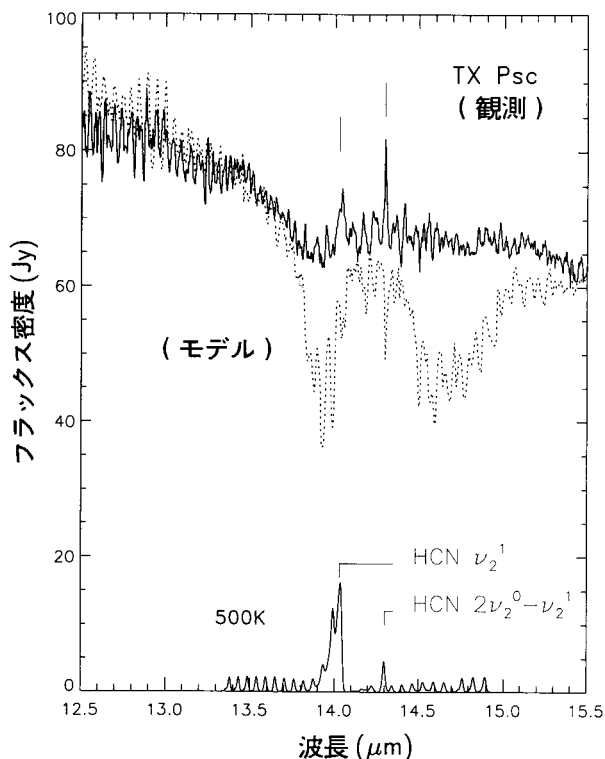


図3：N型星 TX Psc の赤外スペクトル (14  $\mu\text{m}$  域) および対応するモデルから計算された HCN 分子吸収の合成スペクトル (点線)。下は 500 度を仮定した場合に期待される HCN 分子の放射スペクトル。TX Psc のスペクトルには、 $\nu_2^1$  および  $2\nu_2^0 - \nu_2^1$  の Q 分枝の放射が同定された。

によるとみられ、その強度はある温度を仮定しても再現することはできません)。

同様の結果は、酸素過多の星においても、水や二酸化炭素の吸収および放射スペクトルについて得られています<sup>5)</sup>。光球を大きく膨らませる機構としては、ミラ型星にみられるような脈動が一つの可能性として考えられますが、今回扱った TX Psc や WZ Cas は、不規則型もしくは半規則型変光星であり、星の脈動だけで説明するのは難しいと思われます。そこで、我々は、なんらかの別の機構で外層大気がつくられ、そこで多量の分子が形成されているのではないかと考えています。

### 3. 微細構造線もみつかった

さらに長い波長域 (20  $\mu\text{m}$  ~) には、鉄やケイ素などの微細構造線が多数存在しています。その輝線は星形成領域などの研究にしばしば用いられてきましたが、低温度星では明るい超巨星でわずかに観測例があるのみでした。我々の観測プログラムでは、当初、特定の微細構造線にしばった観測はやらなかったのですが、幾つかの AGB 星について SWS の全波長域を高分解能モードで撮るといふ贅沢な観測をやったところ、予想以上に多数の輝線を検出することができました。その後、これらの輝線をねらった追加観測も行って、結果として 5 天体で、鉄、ケイ素、硫黄の微細構造線を見つけることができました。図 4 には、高分解能モードで観測した 10 天体について、25  $\mu\text{m}$  付近のスペクトルを示しました。

これらの微細構造線の励起には少なくとも数百度必要なため、これらの輝線は、星の近く (恒星半径の数倍程度) の領域、すなわち外層大気からの放射であると考えられます。また、測定されたフラックスから、この領域には、 $10^{-6} \sim 10^{-5}$  太陽質量のガスが存在しているの見積もられます。この結果から、外層大気の密度は、水素原子に換算して  $10^9 \sim 10^{10}$  個/cm<sup>3</sup> 程度に達するとみられます。

これらの星については、電波域の CO 分子輝線 (膨張している低温の星周外層からの放射) の観測から、質量放出率はほぼ  $10^{-7}$  太陽質量/年、星周外層の膨張速度は約 10 km/秒と見積もられており、これから星周外層の密度を (星からの距離の 2 乗に反比例するとして) 求めることができます。この星周外層の密度構造を単純に星の近くのところまで拡張していったのでは、先ほど見積もった外層大気の密度よりかなり小さな値になってしまいます。このため、外層大気においては膨張速度は小さく (1 km/秒程度)、したがって密度は高く、途中で加速がおこって、星周外層の膨張速度 (10 km/秒程度) に達する、と考えられます。これは

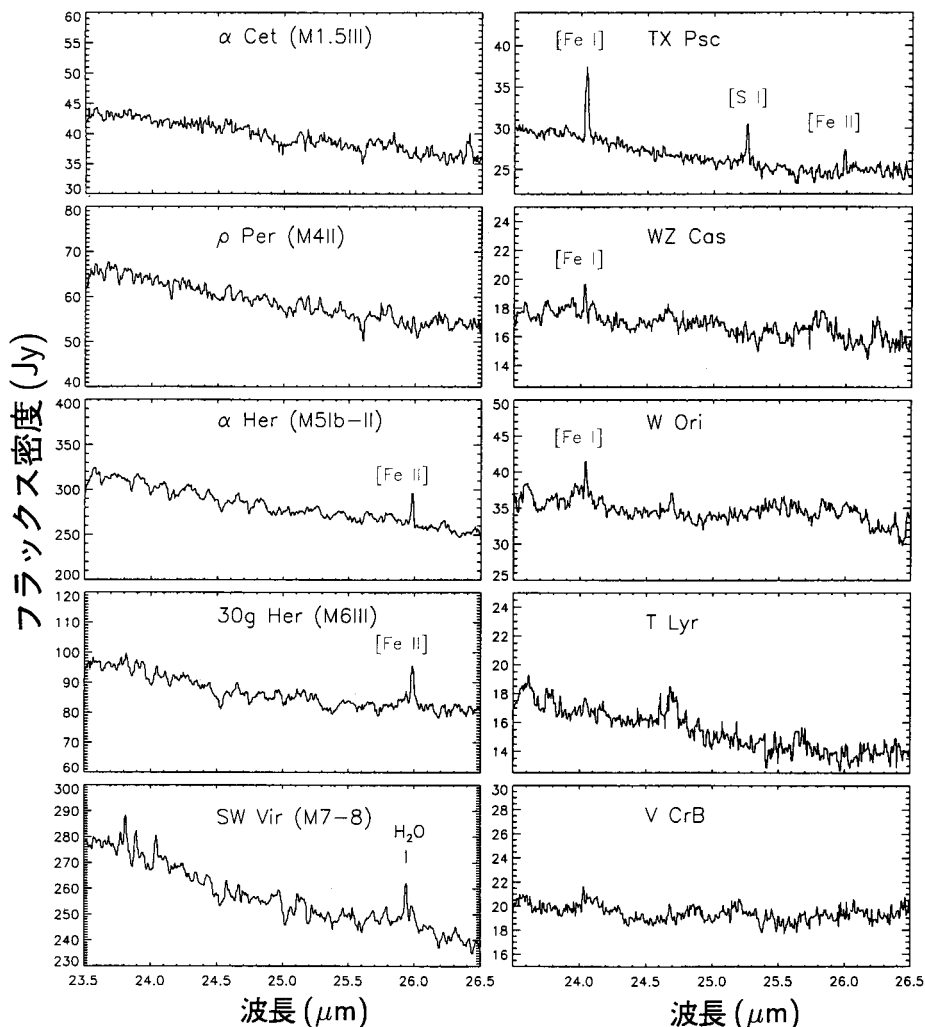


図4：M型星5天体（左側）および炭素星5天体（右側）の25 μm域のスペクトル。検出された微細構造線を図中に示した。

質量放出を起こしている星の一般的な描像と、定性的には一致する結果です。

また、図4からわかるように、M型星では鉄のイオンの輝線が検出されたのに対し、炭素星では中性の鉄や硫黄の輝線が検出されました。すなわち、炭素星に比べて、M型星の外層大気では金属のイオン化が進んでいるということになります。サンプルは十分ではないものの、M型星と炭素星でこのような違いが明確にあらわれたのはやや意外な

結果でした。外層大気での金属のイオン化の原因としては、彩層からの紫外線放射が考えられます。M型星にも炭素星にも、彩層の存在を示す紫外域の輝線が観測されていますが、その彩層の活動性は、M型星のほうが炭素星より強いのかもかもしれません。あるいは、彩層からの紫外線放射を効果的に隠してしまう分子や原子が炭素星の外層大気に大量に存在している可能性もあります。いずれにせよ、彩層からの紫外線放射を考慮した外層大気

の化学過程を考えていく上で、今回の観測結果は重要な情報をもたらしたことになります。

M型星については、星の進化がだいたいスペクトル型に沿っている（より晩期型になる向きに進化していく）と考え、星の進化と外層大気の関係についても議論できます。今回の観測では、M4型までの星（ $\alpha$  Cet,  $\rho$  Per）には、微細構造線が観測されませんでした。これは質量放出率がまだ小さく、外層大気が十分発達していないためであると考えられます（これらの星では、彩層の存在は知られています）。M5-6型（ $\alpha$  Her, 30g Her, 有効温度は約3200-3400度）になると、金属イオンの微細構造線が観測されました。これは外層大気が発達し、かつ彩層の活動も活発であることを意味しています。ところが、M7型（SW Vir）になると、微細構造線は観測されなくなり、かわって水や二酸化炭素のような分子とダストの放射が卓越してきます。この段階に達すると、質量放出はより活発になり、おそらく彩層の活動は弱まっているとみられます。このように、質量放出と彩層を含む外層大気は深く関係しており、ひとつの転機がM6型くらいの星で訪れるようです。

#### 4. おわりに

以上のように、赤色巨星・AGB星には実にさまざまな原子・分子スペクトルが観測されました。この点で、ISO/SWSの力はいかなく発揮されたといえます。今回我々が観測を行った星は、質量放出率はさほど大きくはなく、脈動も小さいとみられますが、こういった天体の赤外スペクトルは予想以上に複雑であり、その解析によって多様な分子や原子（中性およびイオン）を含む密度の高い外層大気の姿が少しずつ明らかになってきています。同時に、新しい問題も提起されています。実際、外層大気を形成する機構はいまだ明らかになっていません。また、金属イオンの微細構造線が

検出されたM型星には、同時に外層大気に起因するとみられる水や二酸化炭素の吸収・放射がみついているものもあり、これをどう統一的に解釈してよいのか——外層大気モデル作成に大きな課題を提起しています。我々のグループも含めて、ISOによって得られたデータは解析途上にあり、その成果と提起する問題に今後とも注目していただきたいと思います。

本稿は、辻隆先生、大仲圭一氏との共同研究<sup>6),7)</sup>の結果をまとめたものです。日本においてISOの観測を主導された奥田治之先生、データ解析においてお世話になった山村一誠氏、観測をサポートしていただいた川良公明氏、佐藤康則氏、田辺俊彦氏、その他ISOの開発・運用に携わっているすべての方々に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 橋本 修, 1996, 天文月報 89, 382
- 2) 田辺 俊彦, 1993, 天文月報 86, 54
- 3) 奥田 治之, 1999, 天文月報 92, 8
- 4) 山村 一誠, 1997, 天文月報 90, 259
- 5) Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W., Yamamura I., 1997, A&A 320, L1
- 6) Aoki W., Tsuji T., Ohnaka K., 1998, A&A 333, L19
- 7) Aoki W., Tsuji T., Ohnaka K., 1998, A&A 340, 222

#### Infrared Spectra of Red Giants - Outer Atmospheres Studied with the ISO/SWS

Wako AOKI

National Astronomical Observatory, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: We detected a variety of molecular features and fine-structure lines of metals in the spectra of red giants observed with the ISO SWS. These discoveries revealed the nature of the outer atmospheres of red giants.